

Aus dem Pathologischen Institut
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
(Direktor: Prof. Dr. Volker Becker)

Die Ossifikation der Trachealspange.
Röntgenologische und morphometrische Untersuchungen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt von
Ludwig Rudolf
aus Dorfen

1980 # 90

Aus dem Pathologischen Institut
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

(Direktor: Prof. Dr. Volker Becker)

Die Ossifikation der Trachealspange.
Röntgenologische und morphometrische Untersuchungen



Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

vorgelegt von
Ludwig Rudolf
aus Dorfen

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg



Dekan: Prof. Dr. W. Kersten

Referent: Prof. Dr. H.-J. Pesch

Korreferent: Prof. Dr. V. Becker

Tag der mündlichen Prüfung: 11.02.1980

Lebenslauf

1. Kindheit

2. Jugend und Schulzeit

3. Beruf

4. Familie und Privatleben

5. Wissenschaftliche und künstlerische Tätigkeit

6. Politische und soziale Betätigung

7. Literatur

8. Sonstiges

Gewidmet meiner Frau Monika

9. Literatur

10. Literatur

11. Literatur

12. Literatur und Bibliographie

13. Literatur

14. Literatur

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	1
Material und Methode	3
Ergebnisse	5
1. Trachealspangenzahl	5
2. Morphometrisch-röntgenologische Befunde der Trachealspangen	
a. Querschnitt	6
b. Verknöcherung	7
c. Verkalkung	8
Diskussion	10
Zusammenfassung	17
Literaturverzeichnis	21
Tabelle und Abbildungen	25
Lebenslauf	45
Danksagungen	46

Einleitung

Die Trachealspangen zeigen im Alter Knochenbildung (PATENKO, 1884; SIMMONDS, 1905; v. ENGELBRECHT, 1914; FRAENKEL, 1914; NEVINNY, 1927; TANTURRI, 1935; LINZBACH, 1944; GLÄSER, 1958). Über Häufigkeit und Zeitpunkt des Auftretens der Verknöcherung existieren unterschiedliche, teils beschreibende (PATENKO, 1884; SIMMONDS, 1905), teils statistisch belegte Untersuchungen (NEVINNY, 1927; AMPRINO und BAIRATI, 1934; GAMMAROTA, 1955; GLÄSER, 1958). Beim Mann wird die Ossifikation häufiger und ausgedehnter beobachtet als beim weiblichen Geschlecht (SIMMONDS, 1905; DREYFUSS, 1916; AMPRINO und BAIRATI, 1934; LINZBACH, 1944). Sie bevorzugt die oberen Trachealspangen der Luftröhre und nimmt nach unten hin an Häufigkeit ab (NEVINNY, 1927). Die Knochenbildung ist auf die äußere Konvexität der Trachealspange beschränkt (SIMMONDS, 1905; NEVINNY, 1927; LINZBACH, 1944). Mit Hilfe der Röntgendiagnostik ist eine schnelle und exakte Bestimmung der Verknö-

cherung möglich (SCHEIER, 1902; SIMMONDS, 1905; FRAENKEL, 1914; FISCHER, 1954). Ihre Ätiologie ist letztlich unklar.

Durch röntgenologische und morphometrische Untersuchungen wurden Querschnittsveränderungen der Trachealspange und ihr Zusammenhang zur Verknöcherung und Verkalkung in Abhängigkeit von Geschlecht und Alter untersucht.

Material und Methode

Untersucht wurden 62 T r a c h e e n von männlichen und 42 von weiblichen Verstorbenen im Alter von 14 - 92 Jahren (Tab. 1).¹

Die in 10%igem neutralem Formalin fixierten Luft-
röhren wurden unterhalb des Kehlkopfes abgesetzt
und von anhaftenden Weichteilen befreit. Sie wurden
in einem Röntgenvollschutztischgerät² im posterior-
anterioren Strahlengang bei einer Betriebsspannung
25 kV und einer Belichtungszeit von 30 - 45 sec ge-
röntgt. Verknöcherte oder verkalkte T r a c h e a l -
s p a n g e n wurden einzeln im cranial-caudalen
Strahlengang bei 25 kV und 30 - 35 sec Belichtungs-
zeit erneut geröntgt. Des weiteren wurden Tracheal-
spangen jeder Dekade salamiartig lamelliert und von
den so erhaltenen Spangenquerschnitten kontrast-
reiche Röntgenbilder hergestellt (PESCH et al., 1975).

¹ Pathologisches Institut (Direktor: Prof. Dr. V. Becker) und Gerichtsmedizinisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg (Direktor: Prof. Dr. H.B. Würmeling) sowie Pathologisches Institut der Städtischen Krankenanstalten Dortmund (Direktor: Prof. Dr. H. Otto), Fürth (Direktor: Prof. Dr. Dr. H. Kühn) und Nürnberg (Direktor: Prof. Dr. G. Fließ).

² Faxitron: Hewlett & Packard, Böblingen.

Bei insgesamt 53 Tracheen aller Altersstufen (Tab. 2) wurden die jeweils ersten 15 Trachealspangen vom Bindegewebe und Perichondrium befreit. Von diesen wurden mit einem Mikrometer die Dicke und Höhe in der Mitte und an den Seiten gemessen (Abb. 1). Bei verschmolzenen Trachealspangen wurden die erhaltenen Höhenwerte gemittelt. Die Meßwerte wurden auf 1/10 gerundet.

Zum Querschnittsbild in der Mitte der Trachealspange sind über die Einführung des Quotienten D_m/H_m quantitative Aussagen möglich. Dort ist wegen der weitgehend planen Außenseite des Trachealspangenquerschnitts die Krümmung der Innenseite dem Quotienten aus Dicke und Höhe (D_m/H_m) des Trachealrings proportional.

Insgesamt 22 verknöcherte und verkalkte Trachealspangen beiderlei Geschlechts und verschiedenen Lebensalters wurden unentkalkt in Methacrylat (BURKHARDT, 1966 und 1970) eingebettet und die K-Mikrotomschnitte mit Hämalaun-Eosin gefärbt.

Ergebnisse

Die T r a c h e a besteht aus 13 - 21, im Durchschnitt aus 17 Trachealspangen. Die Anzahl der T r a c h e a l s p a n g e n ist vom Geschlecht und Alter ^{un}abhängig (Abb. 2).

Die durchschnittliche H ö h e der Trachealspange bleibt im Erwachsenenalter konstant. Sie beträgt beim Mann 3,1 - 4,4, bei der Frau 2,7 - 3,7 mm (Tab. 3; Abb. 3a und b). Männliche Trachealspangen sind im Durchschnitt um 16 % höher als weibliche. Die Standardabweichung der Höhenwerte deutet auf erhebliche intra- und interindividuelle Schwankungen hin (Abb. 3a und b). Die in der Mitte und an den Seiten der Trachealspange gemessenen Höhenwerte entsprechen sich (Abb. 3b).

Die durchschnittliche D i c k e der Trachealspange ist geschlechts- und lokalisationsabhängig verschieden. Sie beträgt beim Mann in der Mitte 1,4 - 2,2 mm und an den Seiten 1,0 - 1,3 mm, bei der Frau entsprechend 1,0 - 1,6 bzw. 0,7 - 1,0 mm (Tab. 3; Abb. 4a und b). Die Dicke nimmt altersabhängig zu. Diese

Dickenzunahme beträgt beim männlichen Geschlecht vom 2. - 8. Lebensjahrzehnt in der Mitte 58 % und an den Seiten 25 %. Beim weiblichen Geschlecht kommt es vom 2. - 8. Lebensjahrzehnt und älter zu einer Dickenzunahme in der Mitte und an den Seiten von 19 % (Abb. 4b). Die Männer erreichen durch dieses altersabhängige Dickenwachstum in der Mitte des Trachealknorpels um 36 % und an den Seiten um 15 % größere Dickenwerte als Frauen. Bei beiden Geschlechtern unterliegt die Dickenzunahme beträchtlichen interindividuellen Schwankungen (Abb. 4a).

Der Q u e r s c h n i t t der Trachealspange zeigt ebenfalls eine altersabhängige Veränderung (Abb. 5). Die kindliche Trachealspange hat in der Mitte wie an den Seiten den weitgehend symmetrischen, flachovalen Querschnitt einer Ellipse. Die Querschnittsform der erwachsenen Trachealspange ist lokalisationsabhängig (Abb. 5; 11a - c).

Der Querschnitt in der M i t t e ist unsymmetrisch: die Außenseite ist flach konvex, gerade oder flach konkav (Abb. 6), die Innenseite stark konvex-gebogen. Die Konvexität der Innenseite nimmt bei breiter interindividueller Streuung im Erwachsenenalter zu (Abb. 7). Männliche Trachealspangen, insbesondere

die verknöcherten, erreichen eine stärker gekrümmte Innenseite als weibliche Spangen entsprechender Altersgruppen (Abb. 7).

Der Querschnitt an den **S e i t e n** dagegen behält im Alter seine ellipsoide Form (Abb. 5; 11a - c).

Die Außenseite wird nur unwesentlich abgeflacht und bleibt in der Regel flach konvex gekrümmt. Die erhaltene Konvexität der Außenseite läßt quantitative Aussagen zur Krümmung der Innenseite an den seitlichen Abschnitten der Trachealringe nicht zu.

Die **V e r k n ö c h e r u n g** der Trachealspange kommt fast nur beim männlichen Geschlecht vor.

Bei weiblichen Tracheen wurde lediglich in 2 Fällen eine geringgradige Verknöcherung beobachtet.

Die Ossifikation wurde beim Mann erstmalig im 31. Lebensjahr mit einer Häufung ab dem 6. Lebensjahrezehnt angetroffen (Tab. 1). Das Röntgenbild zeigt einen spongiösen Knochen mit radiär horizontal ausgerichteter Spongiosastruktur (Abb. 8a und b). Die Verknöcherung tritt bevorzugt an den obersten 5 Trachealringen auf und nimmt nach caudal an Häufigkeit kontinuierlich ab (Tab. 4). Sie beginnt am cranialen oder caudalen Außenrand der mittleren Spangenanteile und breitet sich bei symmetrischen

Trachealspangen in der Regel kontinuierlich und gleichsinnig zu den Seiten hin aus. Die freien Enden werden nicht erreicht (Abb. 9a und b). Bei unsymmetrisch geformten Trachealspangen ist die Verknöcherung am stärker gekrümmten Schenkel weiter fortgeschritten (Abb. 9c). Stark gekrümmte Trachealknorpel zeigen ausgedehnte Verknöcherungen (Abb. 10a und b). Die Ossifikation bleibt auf die äußere Hälfte des Trachealspangenquerschnitts beschränkt (Abb. 11 b). Die durchschnittliche Dicke der u n v e r k n ö c h e r t e n Trachealspange des männlichen Erwachsenen beträgt in der Mitte 1,65 mm. Die v e r k n ö c h e r t e Spange ist mit 1,96 mm um 19 % dicker. Während die unverknöcherten Trachealspangen in 91 % der Fälle zwischen 1,2 - 2,1 mm dick sind, ist die Dicke der verknöcherten auf Werte zwischen 1,7 - 2,4 mm eingeengt (Abb. 12). Dickenwerte unter 1,7 mm wurden bei unverknöcherten Trachealspangen in 54 %, bei verknöcherten indes nur bei 7 % der Fälle gemessen.

Die V e r k a l k u n g findet sich bei alten Trachealspangen. Sie kommt beim Mann frühestens ab dem 48., bei der Frau ab dem 56. Lebensjahr vor (Tab. 1). Die Verkalkung zeigt im Röntgenbild körne-

lige oder plaqueartige Struktur. Sie ist dadurch gut von der Spongiosastruktur der Verknöcherung abgrenzbar. Ihr Ausmaß reicht von kleinen Kalkspritzern bis zur vollständigen Verkalkung des gesamten Luftröhrenknorpels. Besonders ausgeprägte Verkalkungen weisen Luftröhren alter Frauen auf (Abb. 8c). Kalkablagerungen finden sich gehäuft an der oberen bzw. unteren Trachealspangenkante und an den Rändern von Verknöcherungsarealen. Eine primäre Lokalisation an den Seiten und ein Befall des gesamten Trachealquerschnitts ist möglich (Abb. 10c; 11c).

Bei den Männern beträgt die in der Mitte der Trachealspange gemessene durchschnittliche Dicke bei unverkalkten Trachealspangen 1,62, bei verkalkten 1,74 mm. Bei den Frauen sind die unverkalkten Spangen durchschnittlich 1,29, die verkalkten 1,37 mm dick (Abb. 13). Verkalkte Trachealspangen sind bei beiden Geschlechtern um 6 % dicker als unverkalkte der entsprechenden Altersstufen. Kalkeinlagerungen werden bei erwachsenen Trachealspangen jeder gemessenen Dicke gefunden (Abb. 14).

Die histologischen und röntgenologischen Diagnosen der Verknöcherung und Verkalkung stimmen überein.

Diskussion

Die untersuchten T r a c h e e n bestanden aus 15 - 21 Trachealspangen (SIEGLBAUER, 1940; v. LANZWACHSMUTH, 1955; BENEKE et al., 1968; ROHEN, 1975). Die Anzahl der T r a c h e a l s p a n g e n erweist sich alters- und geschlechtsunabhängig. Das Längenwachstum der Luftröhre ist deshalb nicht über eine Vermehrung der Trachealspangen, sondern über deren Höhenwachstum zu erklären (BENEKE et al., 1968). Die im Durchschnitt kürzere Trachea der Frau (OPPIKOFER, 1914; HARTUNG, 1964) hat somit ihre Ursache in der geringeren Höhe der weiblichen Trachealspange.

Die für die erwachsene Trachealspange gemessenen Werte der H ö h e von 3 - 4 mm und der D i c k e von 1,0 - 2,5 mm stimmen mit früheren Untersuchungen überein (SIEGLBAUER, 1940). Höhen- und Dickenwerte der Trachealspange unterscheiden sich in ihrem Verhalten grundsätzlich. Die in der Mitte und an den Seiten der Trachealspange gemessenen durchschnittlichen Höhenwerte sind gleich. Dagegen ist die Trachealspange in der Mitte um 50 - 75 % dicker als an den Seiten. Während der Trachealknorpel in seiner

Höhe im Erwachsenenalter konstant bleibt, nimmt er über den Abschluß des Körperwachstums hinaus im Alter an Dicke zu. Das Dickenwachstum ist lokalisations- und geschlechtsabhängig. Es ist in der Mitte der Trachealspange am ausgeprägtesten. Männer weisen hier gegenüber Frauen bis zu 36 % dickere Trachealspangen auf. Somit konnte die Theorie BENNINGHOFFs (1924), daß der Trachealknorpel wegen seiner funktionellen Struktur zum Dickenwachstum im Erwachsenenalter nicht fähig ist, ebenso wenig bestätigt werden wie Meßuntersuchungen BENEKEs (1968), daß die Trachealspangendicke ab dem 10. Lebensjahr konstant bleibt.

Die Dickenzunahme der Trachealspange führt zu charakteristischen Veränderungen des Q u e r s c h n i t t s. In der Mitte, am Ort der größten Dickenzunahme, wird er mit zunehmendem Alter bei flacher Außenseite und stark konvexer Innenseite halbkreisförmig umgeformt (SIEGLBAUER, 1940). Das Dickenwachstum beschränkt sich somit auf die Innenseite des Trachealspangenquerschnitts, während die Außenseite zumeist abgeflacht wird. An den Seiten ist infolge der geringen Dickenzunahme die Querschnittsveränderung nicht so augenfällig, so daß eine ellipsoide Querschnittsform

erhalten bleibt. Die Annahme eines konzentrischen Trachealspangenwachstums unter Beibehaltung der elliptischen Querschnittsform (BENEKE et al., 1968) kann mit Einschränkung deshalb nur für die Seiten gelten.

Die V e r k n ö c h e r u n g der Trachealspange wird vorwiegend beim männlichen Geschlecht mit einer Zunahme der Häufigkeit im Alter beobachtet (SIMMONDS, 1905; DREYFUSS, 1916; AMPRINO und BAIRATI, 1934; GLÄGER, 1958). Die Geschlechts- und Altersabhängigkeit der Ossifikation ist über den Zusammenhang von Verknöcherung und Dicke des Trachealknorpels erklärbar (LINZBACH, 1944). Die Verknöcherung tritt in der Regel erst ab einer bestimmten "kritischen" Trachealspangendicke auf und nimmt mit wachsender Dicke an Häufigkeit zu. Als "kritische" Dicke wurden 1,7 mm gemessen, die zumeist nur von Männern und hier vor allem ab dem 6. Lebensjahrzehnt erreicht wird. Verknöcherte Trachealspangen bleiben in ihrer Dicke weitgehend konstant, d.h. sie verlangsamen ihr Dickenwachstum bzw. stellen es ganz ein.

Die Ossifikation ist ein von der Höhe des Trachealrings unbeeinflusster Vorgang. Entsprechend der grossen Dickenwerte ist der Querschnitt des mittleren

Trachealspangenabschnitts bei verknöcherten Trachealspangen halbkreisähnlich. Die früher beschriebenen Gesetzmäßigkeiten von Lokalisation und Ausbreitung der Verknöcherung (SIMMONDS, 1905; NEVINNY, 1927; LINZBACH, 1944; GLÄSER, 1958) ließen sich in dieser Arbeit bestätigen. Die Ossifikation ist an der äußeren Konvexität der Trachealspangen lokalisiert und bleibt auf die äußere Hälfte des Spangenquerschnitts beschränkt. Die Ausbreitung der Verknöcherung ist von der Krümmung des Trachealrings abhängig. Im Idealfall einer symmetrischen Trachealspange breitet sich die Ossifikation gleichmäßig zu den Seiten hin aus. Bei unsymmetrisch geformten Trachealknorpeln schreitet die Verknöcherung am stärker gebogenen Schenkel schneller voran. Die säbelscheidenförmig deformierte Trachealspange mit stark gebogenem medialem Abschnitt verknöchert regelmäßig (SIMMONDS, 1905). Der Zusammenhang von Krümmung des Trachealknorpels und Verknöcherung erklärt die bevorzugte Ossifikation der oberen 5 Trachealspangen. Der beim männlichen Geschlecht vom 4. - 8. Lebensjahrzehnt zunehmende sagittale Durchmesser der Trachealspangen (BENEKE et al., 1968) findet sich vor allem am oberen Trachealdrittel und führt dort zu einer Umformung im Sinne der Säbelscheidentrachea, der zur bevorzugten Ossifikation disponierten Trachealspangenform.

Histologisch entspricht die Ossifikation lamellärem Knochen mit Markraumbildung (NEVINNY, 1927; BLUMENFELD und JAFFE, 1931; GLÄSER, 1958). Die Verknöcherung wird als enchondral und perichondral (NEVINNY, 1927; GLÄSER, 1958), als enchondral (BENNINGHOFF, 1925) bzw. als der enchondralen Ossifikation ähnlicher Vorgang (LINZBACH, 1944) bezeichnet.

Die Ätiologie der Ossifikation war bis vor kurzem ungeklärt. So wurden früher zumeist die Grundkrankheiten wie Lungen- und Stoffwechselerkrankungen als Ursachen der Ossifikation diskutiert (SIMMONDS, 1905; TANTURRI, 1935). Untersuchungen über den Zusammenhang von Trachealspangendicke und Knochenbildung führten zur Theorie von der Verknöcherung als regressivem Vorgang (LINZBACH, 1944 und 1947). Die Ossifikationsursache ist dabei nach LINZBACH (1942 und 1947) eine Gewebsazidose, die durch Hypoxie des für die Diffusionsernährung zu dicken Knorpels ausgelöst wird. Dem widerspricht prinzipiell, daß der Knochen ein hochdifferenziertes Parenchym darstellt. Die strenge Gesetzmäßigkeit in Entstehung und Ausbreitung der Verknöcherung, ihre klare Abhängigkeit zum Dickenwachstum der Trachealspange und die charakteristische Veränderung des Trachealspangenquerschnitts legen die Existenz eines über-

geordneten physikalischen Ordnungsprinzipes nahe. Ausgehend von Untersuchungen der Luftröhrenmechanik (v. LANZ-WACHSMUTH, 1955), der funktionellen Knorpelstruktur (BENNINGHOFF, 1922, 1924, 1925; PETERSEN, 1935) sowie des Einflusses mechanischer Kräfte auf den Knorpel (KROMPECHER, 1934, 1937; PAUWELS, 1960) ist die Ossifikation als Folge der auf die Trachealspange einwirkenden Zugspannung zu erklären (PESCH et al., 1979; BOGENBERGER, 1979).

Die Verkalkung ist ein häufiger Befund alter Trachealspangen (GLÄSER, 1958). Kalkanlagerungen werden beim männlichen Geschlecht ab dem 5., beim weiblichen erst ab dem 6. Lebensjahrzehnt gefunden. Die Verkalkung läßt die Regelmäßigkeit der Verknöcherung in Lokalisation und Ausbreitung vermissen. Kalk kann sich primär an den Seiten einlagern. Ein Befall der inneren Trachealspangenhälfte bis zur Verkalkung des gesamten Spangenquerschnittes ist möglich. Verkalkte Trachealringe sind zwar geringfügig dicker als unverkalkte: die Dickendifferenz ist aber weit geringer als zwischen verknöchertem bzw. unverknöchertem Trachealspange. Da Kalk in Trachealknorpel jeder gemessenen Dicke gefunden wurde, gibt es keine "kritische" Dicke der Verkalkung. Die

Kalkeinlagerung ist eine von der Trachealspangendicke unbeeinflusste, lediglich vom Alter abhängige Veränderung des Trachealknorpels. Sie ist zweifellos frei als degenerativer Vorgang anzusehen (LINZBACH, 1944).

Zusammenfassung

Bei 104 Verstorbenen beiderlei Geschlechts im Alter von 14 - 92 Jahren wurden T r a c h e e n auf Verknöcherung bzw. Verkalkung röntgenologisch untersucht. Diese Strukturveränderungen des T r a - c h e a l k n o r p e l s wurden mit dem an definierten Stellen morphometrisch ermittelten Querschnitt der T r a c h e a l s p a n g e n in Beziehung gesetzt.

Die Trachea besteht aus 13 - 21 Trachealspangen, die keine alters- oder geschlechtsspezifischen Unterschiede aufweisen.

Die durchschnittliche H ö h e der Trachealspange bleibt im Erwachsenenalter konstant. Sie beträgt beim Mann 3,1 - 4,4, bei der Frau 2,7 - 3,7 mm und ist in der Mitte wie an den Seiten gleich. Männliche Trachealspangen sind gegenüber weiblichen um 16 % höher.

Die D i c k e der Trachealspange zeigt in der Mitte höhere Werte als an den Seiten. Bei den Män-

nern ist die Trachealspange in der Mitte 1,4 - 2,2, an den Seiten 1,0 - 1,3 mm, bei den Frauen in der Mitte 1,0 - 1,6 und an den Seiten 0,7 - 1,0 mm dick. Vom 2. bis zum 8. Lebensjahrzehnt und älter kommt es beim Mann zu einer Dickenzunahme der Trachealspange in der Mitte von 58 % und an den Seiten von 25 %, bei der Frau in der Mitte und an den Seiten von 19 %.

Männer erreichen durch altersabhängiges Dickenwachstum in der Mitte der Trachealspange um 36 % und an den Seiten um 15 % größere Dickenwerte als Frauen.

Der flach-ovale, weitgehend symmetrische Q u e r s c h n i t t der dünnen, kindlichen Trachealspange wird mit zunehmendem Alter in einen unsymmetrischen Querschnitt mit stark konvexbogiger Innenseite und flacher Außenseite umgeformt. Diese Querschnittsänderung ist in der Mitte deutlich ausgeprägter als an den Seiten.

Die V e r k n ö c h e r u n g tritt fast ausschließlich beim männlichen Geschlecht auf. Sie wird zuerst ab dem 31. Lebensjahr mit einer Häufung ab dem 6. Lebensjahrzehnt beobachtet. Das Röntgenbild zeigt spongiösen Knochen. Die Verknöcherung bevorzugt das

obere Luftröhrendrittel. Sie beginnt am kranialen oder kaudalen Außenrand des mittleren Spangenteils und breitet sich zumeist kontinuierlich und symmetrisch zu den Seiten aus. Die Ossifikation bleibt auf die äußere Hälfte des Trachealquerschnitts beschränkt. Verknöcherungen treten in der Regel erst ab der "kritischen" Trachealspangendicke von 1,7 mm auf und nehmen bei höheren Werten an Häufigkeit zu.

Die Verkalkung ist eine Veränderung des alten Trachealknorpels. Sie kommt bei Männern ab dem 4., bei Frauen ab dem 5. Lebensjahrzehnt vor. Röntgenmorphologisch zeigt sie körnelige und plaqueartige Strukturen. Verkalkungen finden sich gehäuft an der oberen bzw. unteren Trachealspangenkante und an den Rändern von Verknöcherungsarealen. Eine primäre Lokalisation an den Seiten wie ein Befall des gesamten Trachealquerschnitts ist möglich. Es verkalken Trachealspangen jeder gemessenen Dicke.

Während die Trachealspangenhöhe im Erwachsenenalter konstant bleibt, nimmt die Dicke im Alter vor allem in der Mitte männlicher Trachealknorpel weiter zu. Das Dickenwachstum beschränkt sich auf die Innenseite des Trachealspangenquerschnitts und führt zu

charakteristischen Veränderungen des Querschnittsbildes. Die Existenz einer zur Ossifikation des Trachealknorpels notwendigen "kritischen" Dicke erklärt das fast ausschließliche Auftreten der Verknöcherung beim älteren Mann. Verknöcherte Trachealspangen verlangsamen ihr Dickenwachstum, bzw. stellen es ganz ein. Lokalisation und Ausbreitung der Verknöcherung unterliegen festen Gesetzmäßigkeiten. Die Abhängigkeit der Ossifikation von der Krümmung der Trachealspange erklärt die bevorzugte Verknöcherung der Säbelscheidentrachea und der beim älteren Mann säbelscheidenförmig deformierten oberen Trachealspangen der Luftröhre. Ursachen der Verknöcherung sind nicht verschiedene Krankheiten bzw. eine Gewebsazidose des Knorpels, sondern die auf die Trachealspange einwirkende Zugspannung. Die Verkalkung dagegen erfolgt regellos und ist als rein degenerativer Vorgang anzusehen.

Literaturverzeichnis

- Amprino, R., A. Bairati:
Studi sulle trasformazione delle cartilagini
dell' uomo nell accrescimento e nella senes-
cenza.
Zschr. Zellforsch. 20, 143-205 (1934)
- Beneke, G., O. Endres, H. Becker, H. Nitschke:
Wachstum und altersabhängige Strukturverän-
derungen der menschlichen Trachea.
Virchows Arch. path. Anat. 341, 353-364 (1966)
- Beneke, G., O. Endres, H. Becker, R. Kulka:
Über Wachstum und Degeneration des Tracheal-
knorpels.
Virchows Arch. path. Anat. 341, 365-380 (1966)
- Benninghoff, A.:
Über den funktionellen Bau des Knorpels.
Verh. Anat. Ges. 31, 250-267 (1922)
- Benninghoff, A.:
Experimentelle Untersuchungen über den Ein-
fluß verschiedenartiger mechanischer Bean-
spruchungen auf den Knorpel.
Verh. Anat. Ges. 33, 194-215 (1924)
- Benninghoff, A.:
Der funktionelle Bau des Hyalinknorpels.
Erg. Anat. 26, 1-54 (1925)
- Blumenfeld, J., R. Jaffè:
Pathologie der oberen Luft- und Speisewege.
Leipzig: Kabitzsch 1931
- Bogenberger, Th.:
Zum Ossifikationsprinzip der Trachealspangen.
Röntgenologisch-topographische und mechanische
Untersuchungen.
Inaug. Diss. Erlangen 1979

- Burkhardt, R.:
Irreparative Voraussetzungen zur klinischen
Histologie des menschlichen Knochenmarkes.
(1. Mitt.) Blut XIII, 337-357 (1966)
- Burkhardt, R.:
Farbatlas der klinischen Histopathologie
von Knochenmark und Knochen.
Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1970
- Dreyfuss, R.:
Normale und krankhafte Veränderungen in
Kehlkopf und Luftröhre.
Beitr. Klin. Chir. 102, 426-437 (1916)
- Engelbrecht, v. H.:
Über die Altersveränderungen in den Knor-
pelringen der Trachea.
Virchows Arch. path. Anat. 216, 331-339 (1914)
- Fraenkel, E.:
Anatomisch-röntgenologische Untersuchungen
über die Luftröhre.
Fortschr. Röntgenstr. 21, 269-283 (1914)
- Fischer, E.:
Über die Rippen und Bronchialknorpelver-
kalkung im Alter.
Zschr. f. Altersforsch. 8, 144-150 (1954/55)
- Gammarrata, V.:
Morphologie normale et pathologique des
cartilages trachéo-bronchiques.
Bronches 5, 46-83 (1955)
- Gläser, A.:
Zur rheumatischen Orthologie und Pathologie
der Tracheobronchialknorpel.
Zschr. Altersforsch. 12, 257-275 (1958)
- Hartung, W.:
Zur Histomechanik der Trachea.
Verh. dtsh. Ges. Path. 48, 330-331 (1964)

Krompecher, S.:

Die Entwicklung der Knochenzellen und die Bildung der Knochengrundsubstanz bei der knorpelig und bindegewebig vorgebildeten sowie der primären reinen Knochenneubildung.
Anat. Anz. 78, 34-53 (1934)

Krompecher, S.:

Die Knochenbildung.
Jena: Fischer 1937

Lanz, v.T., W. Wachsmuth:

Praktische Anatomie Bd. 1 Teil 2
Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1955

Linzbach, A.J.

Vergleich der dystrophischen Vorgänge an Knorpel und Arterien als Grundlage zum Verständnis der Arteriosklerose.
Virchows Arch. path. Anat. 311, 432-508 (1944)

Linzbach, A.J.:

Das ökonomische Prinzip in der Sauerstoffversorgung der Nieren, des Herzens und des Stützgewebes.
Zschr. inn. Med. 2, 144-151 (1947)

Nevinny, H.:

Die Veränderungen der menschlichen Trachealknorpel unter physiologischen und pathologischen Bedingungen.
Zschr. Anat. Abt. II Zschr. Konstit.lehre 13, 155-198 (1927)

Oppikofer, E.:

Wachsparaffinausgüsse der Luftröhre in situ der Organe hergestellt.
Arch. Laryng. Rhinol. (Berl.) 27, 1-10 (1914)

Patenko: Der Kehlkopf in gerichtsmedizinischer Beziehung.

Viertelj. f. ger. Med. 41, 214 (1884)

- Pauwels, F.:
Eine neue Theorie über den Einfluß mechanischer Reize auf die Differenzierung der Stützgewebe.
Z. Anat. Entwickl. Gesch. 121, 478-515 (1960)
- Pesch, H.-J., F. Henschke, U. Zeus:
Neue Aspekte zur Methode des Knochengroßflächenschliffs.
Verh. Dtsch. Ges. Path. 59, 592 (1975)
- Pesch, H.-J., Th. Bogenberger, L. Rudolf, R. Thull:
Neue Aspekte zum Ossifikationsprinzip der Trachealknorpel. Röntgenologische, morphometrische und mechanische Untersuchungen.
Proceedings V. Congr. Anat. Europ. Prag 574 (1979)
- Petersen, H.:
Histologie und mikroskopische Anatomie.
München: Bergmann 1935
- Rohen, J. W.:
Funktionelle Anatomie des Menschen.
Stuttgart-New York: Schattauer 1975
- Scheier, M.:
Über die Ossifikation des Kehlkopfes.
Arch. mikroskop. Anat. u. Entw.mechan. 59, 220-258 (1902)
- Sieglbauer, F.:
Lehrbuch der normalen Anatomie des Menschen.
Berlin-Wien: Urban und Schwarzenberg 1940
- Simmonds, M.:
Über die Alterssäbelscheidentrachea.
Virchows Arch. path. Anat. 179, 15-28 (1905)
- Tanturri, V.:
Über die Bedeutung der sogenannten chondroosteoplastischen Tracheopathie und über die Altersveränderungen der Luftröhre.
Mtschr. Ohr.h.k. 11, 1358-1365 (1935)

Alter (Jahre)	Gesamtzahl (n)	verknöchert (u. ggf. verkalkt) (n)	verkalkt (n)	knochen- und kalkfrei (n)
♂ 10 - 19	4	-	-	4
20 - 29	2	-	-	2
30 - 39	5	1	-	4
40 - 49	10	3	5	2
50 - 59	8	6	1	1
60 - 69	10	5	3	2
70 - 79	20	13	5	2
80 - 89	3	2	1	-
	62	30	15	17
♀ 10 - 19	2	-	-	2
20 - 29	2	-	-	2
30 - 39	4	-	-	4
40 - 49	3	-	-	3
50 - 59	9	-	5	4
60 - 69	9	-	5	4
70 - 79	8	1	3	4
80 - 89	4	1	3	-
90 - 99	1	-	1	-
	42	2	17	23

Tab. 1: Zusammenstellung der untersuchten Luftröhren in
Abhängigkeit von Geschlecht und Lebensalter

Alter (Jahre)	Gesamtzahl (n)	verknöchert (u. ggf. verkalkt) (n)	verkalkt (n)	knochen- und kalkfrei (n)
♂ 10 - 19	2	-	-	2
20 - 29	1	-	-	1
30 - 39	3	1	-	2
40 - 49	5	1	3	1
50 - 59	4	3	-	1
60 - 69	8	3	3	2
70 - 79	13	10	1	2
	36	18	7	11
♀ 10 - 19	2	-	-	2
20 - 29	2	-	-	2
30 - 39	1	-	-	1
40 - 49	2	-	-	2
50 - 59	4	-	1	3
60 - 69	2	-	2	-
70 - 79	4	1	1	2
und älter				
	17	1	4	12

Tab. 2: Zusammenstellung der morphometrisch untersuchten Trachealspangen in Abhängigkeit von Geschlecht und Lebensalter

Alter (Jahre)	Zahl der Tracheal- spangen (n)	Höhe Seite (mm)	s	Höhe Mitte (mm)	s	Dicke Seite (mm)	s	Dicke Mitte (mm)	s
♂ 10 - 15	29	2.73	0.70	2.67	0.75	0.89	0.26	1.22	0.27
20 - 29	8	4.23	0.72	3.95	0.69	1.01	0.10	1.54	0.15
30 - 39	46	3.79	0.84	3.61	0.58	1.02	0.20	1.57	0.31
40 - 49	72	3.99	1.04	3.90	1.10	1.06	0.19	1.65	0.20
50 - 59	59	3.87	0.87	3.94	0.80	1.12	0.24	1.82	0.33
60 - 69	122	3.77	0.82	3.64	0.81	1.13	0.21	1.73	0.36
70 - 79	190	3.90	0.88	3.74	0.78	1.11	0.19	1.93	0.26
♀ 17 - 19	30	3.67	0.91	3.59	0.75	0.78	0.15	1.18	0.11
20 - 29	29	3.40	1.03	3.37	1.01	0.74	0.16	1.15	0.13
30 - 39	15	3.14	0.94	3.47	0.65	0.62	0.16	1.04	0.12
40 - 49	30	3.15	0.70	3.23	0.71	0.86	0.21	1.18	0.16
50 - 59	60	3.21	0.80	3.23	0.66	0.80	0.21	1.27	0.22
60 - 69	44	3.21	0.72	3.33	0.69	1.02	0.18	1.51	0.38
70 - 79	39	3.08	0.67	3.24	0.93	0.82	0.13	1.24	0.15
80 - 89	15	3.58	0.84	3.46	0.40	0.93	0.16	1.41	0.16

Tab. 3: Mittelwerte und Standardabweichungen (s) der in der Mitte und an den Seiten der Trachealspange gemessenen Höhen- und Dickenwerte in Abhängigkeit von Geschlecht und Lebensalter
(n = 788 Trachealspangen)

Fortlaufende Trachealspange (Nr.)	Trachealspangen		
	insgesamt (n)	verknöchert (n)	%
1	32	21	65,2
2	32	24	75,0
3	32	25	78,1
4	32	25	78,1
5	32	24	75,0
6	32	19	59,4
7	32	22	68,1
8	32	19	59,4
9	32	18	56,2
10	32	16	50,0
11	32	17	53,1
12	32	15	46,9
13	32	17	53,1
14	30	14	46,7
15	30	12	40,0
16	27	12	44,4
17	22	9	40,9
18	16	4	25,0
19	8	1	12,5
20	3	-	-
21	1	-	-

Tab. 4: Häufigkeit der Verknöcherung der einzelnen Trachealspangen

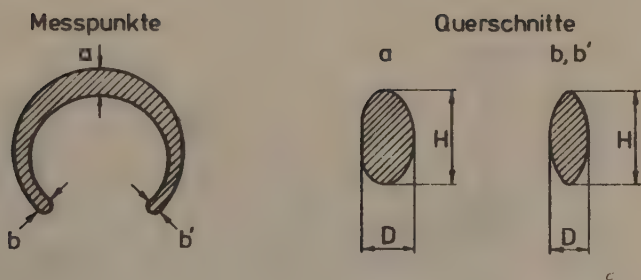


Abb. 1: Schematische Darstellung der Meßpunkte
(a = Mitte, b, b' = freie Enden)
der Trachealspange zur Bestimmung der
Dicke (D) und der Höhe (H)

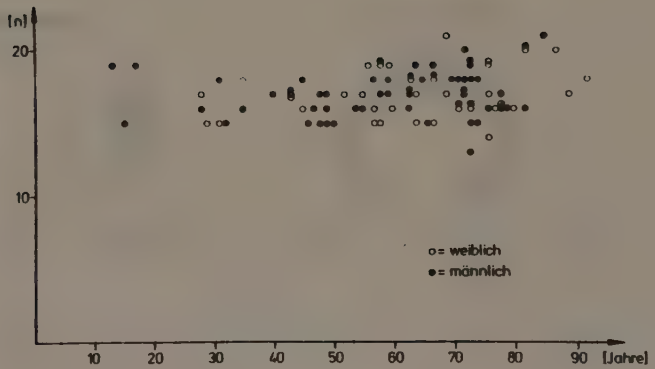


Abb. 2: Zahl der Trachealspangen in Abhängigkeit von Geschlecht und Lebensalter (n = 104 Tracheen)

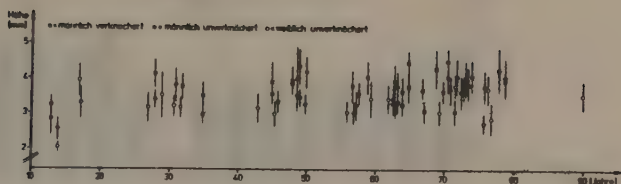


Abb. 3a: Mittelwerte und Standardabweichungen (s)
der durchschnittlichen H ö h e der
Trachealspangen in Abhängigkeit von
Geschlecht und Lebensalter
(n = 53 Tracheen)

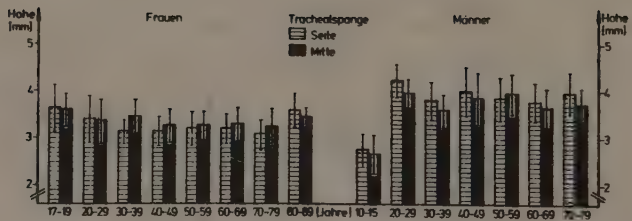


Abb. 3b: Mittelwerte und Standardabweichungen (s) der in der Mitte und an den Seiten der Trachealspange gemessenen Höhe in Abhängigkeit von Geschlecht und Lebensalter (n = 788 Trachealspangen)

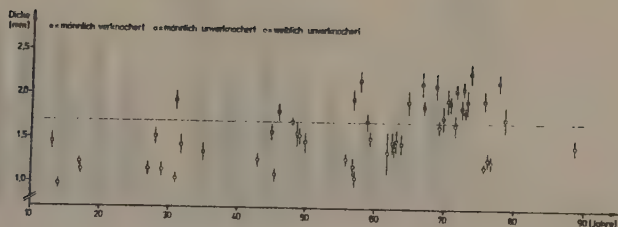


Abb. 4a: Mittelwerte und Standardabweichungen (s) der in der Mitte der Trachealspange gemessenen durchschnittlichen D i c k e in Abhängigkeit von Geschlecht und Lebensalter (n = 53 Tracheen)

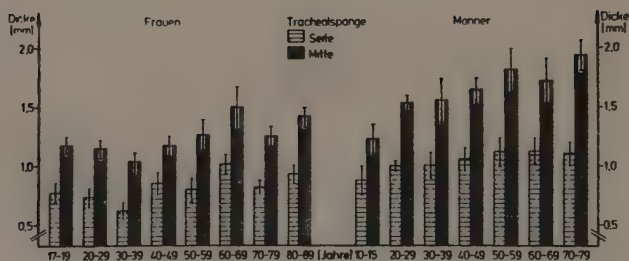


Abb. 4b: Mittelwerte und Standardabweichungen (s) der in der Mitte und an den Seiten der Trachealspange gemessenen Dicke in Abhängigkeit von Geschlecht und Lebensalter
(n = 788 Trachealspangen)

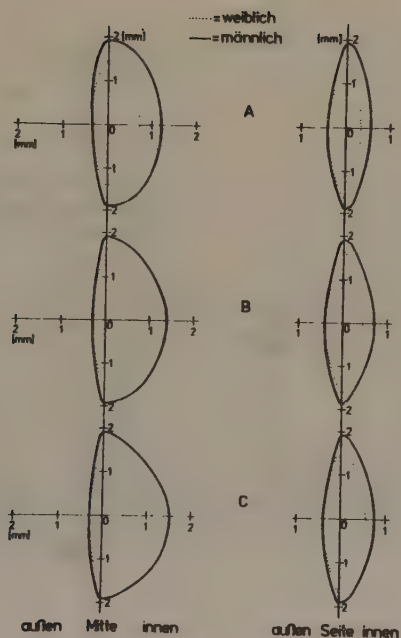


Abb. 5: Schema des Querschnitts in der Mitte und an den Seiten der Trachealspange in Abhängigkeit von Geschlecht und Lebensalter
(A: 20 - 39 Jahre, B: 40 - 59 Jahre und C: 60 - 79 Jahre und älter)

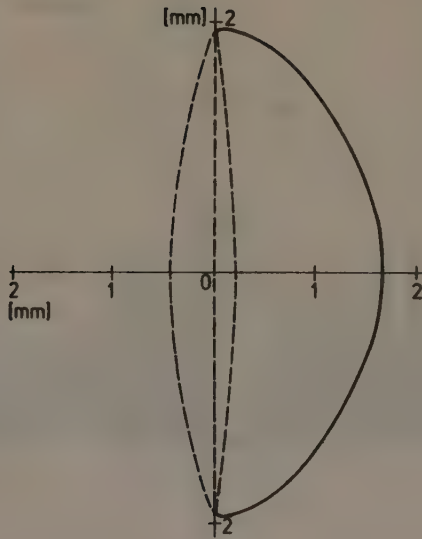


Abb. 6: Formvariationen der ventralen Fläche der
Trachealspangen (schematische Darstellung)

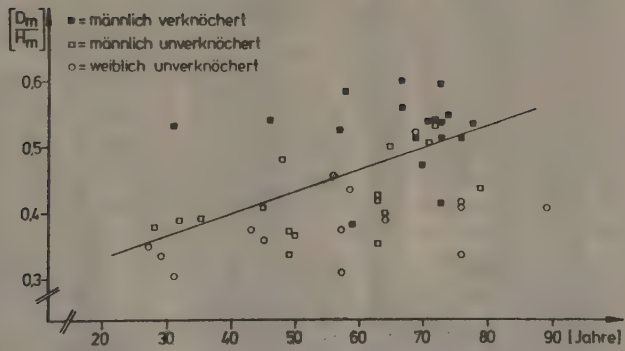


Abb. 7: Quotient $\frac{D_m}{H_m}$ in Abhängigkeit von Verknöcherung, Geschlecht und Lebensalter



Abb. 8 a-c: Röntgenbilder von Tracheen im posterior-
anterioren Strahlengang (Abbildungsmaß-
stab 1:1)

a: Verknöcherte Trachea (54 J., männl.)

b: Verknöcherte und verkalkte Trachea
(72 J., weibl.)

c: Verkalkte, nicht-verknöcherte Trachea
(80 J., weibl.)

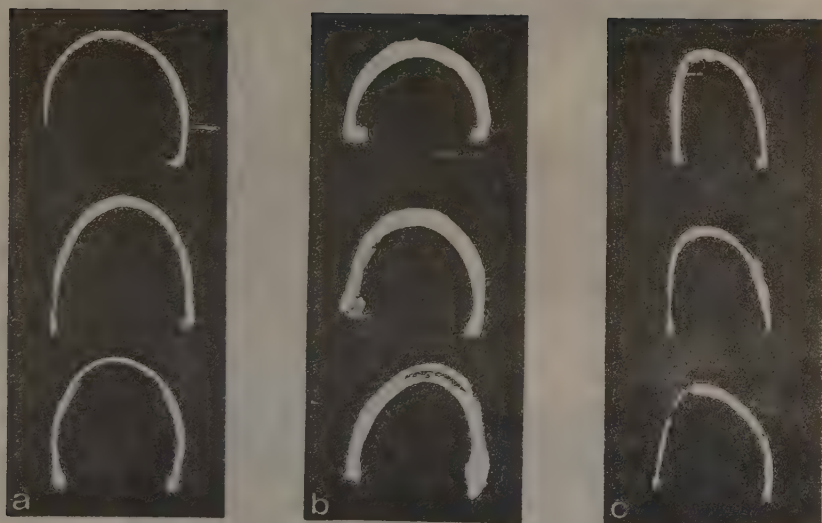


Abb. 9 a-c: Röntgenabbildungen von Trachealspangen
im cranial-caudalen Strahlengang
(Abbildungsmaßstab 1:1)

a-b: Gleichmäßig sich ausbreitende Verknöcherung bei symmetrisch geformten Trachealspangen (a: 58 J., männl.; b: 57 J., männl.)

c: Diskontinuierliche Verknöcherungsausbreitung bei unsymmetrisch geformten Trachealspangen (46 J., männl.)

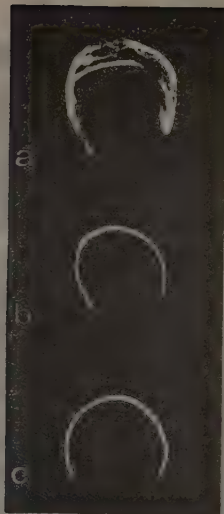


Abb. 10 a-c: Röntgenbilder von Trachealspangen
im cranial-caudalen Strahlengang
(Abbildungsmaßstab 1:1)

a-b: Ausgedehnte Verknöcherungen bei
stark gekrümmten Trachealspangen
(a und b: 47 J., männl.)

c: Verkalkter Trachealring (77 J., weibl.)

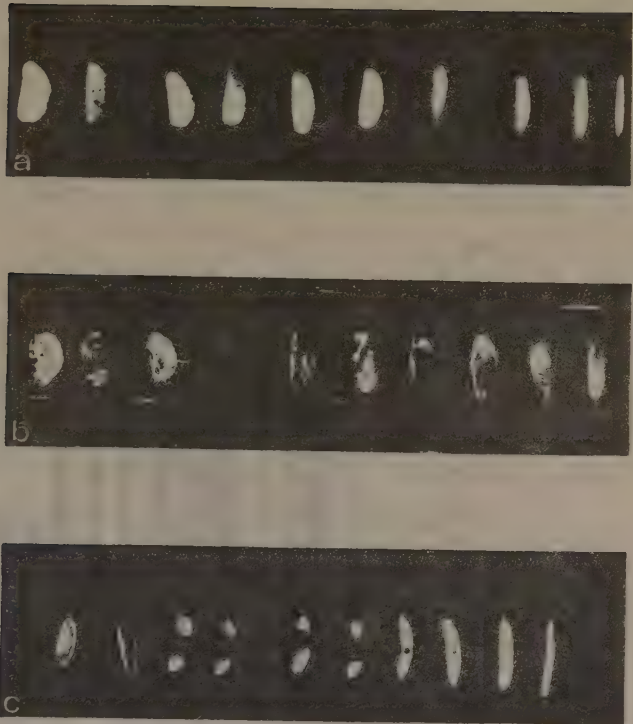


Abb. 11 a-c: Röntgenbilder von Querschnitten
lamellierter Trachealspangenhälften
(Abbildungsmaßstab 1:1)
a: Unverknöcherte und unkalkte
Trachealspange (46 J., männl.)
b: Verknöcherte Trachealspange
(71 J., männl.)
c: Verkalkte Trachealspange (77 J., weibl.)

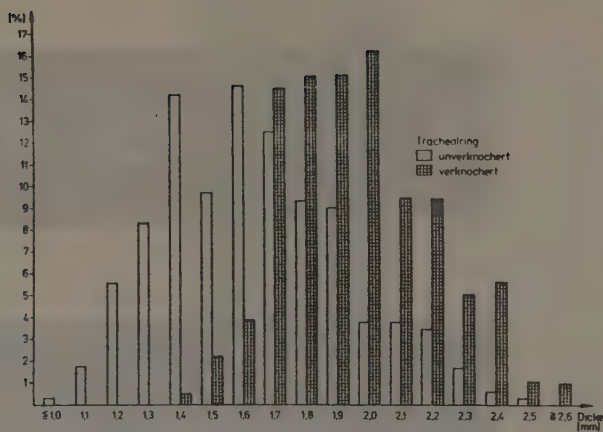


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung der in der Mitte der Trachealspange gemessenen D i c k e bei verknöcherten und unverknöcherten männlichen Trachealspangen der 4. - 7. Lebensdekade

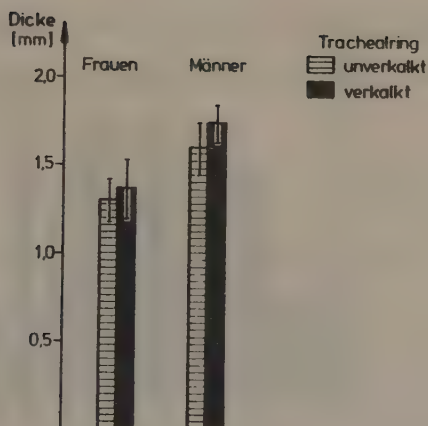


Abb. 13: Mittelwerte und Standardabweichungen (s) der in der Mitte der Trachealspange gemessenen **D i c k e** bei verkalkten und unverkalkten Trachealspangen der 4. - 9. Lebensdekade in Abhängigkeit vom Geschlecht

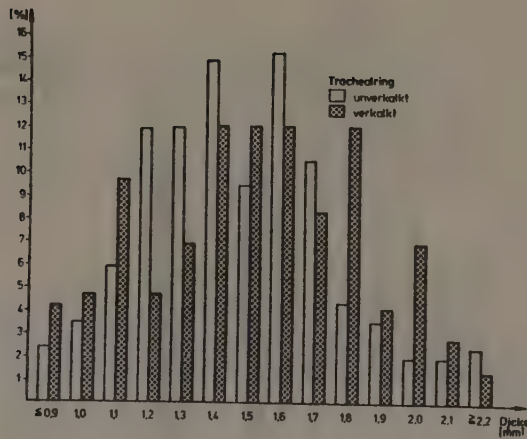


Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der in der Mitte der Trachealspange gemessenen D i c k e bei verkalkten und unverkalkten männlichen und weiblichen Trachealspangen der 5. - 9. Lebensdekade

Lebenslauf

Am 3. Oktober 1952 wurde ich als Sohn des Tierarztes Dr. Emil Rudolf und seiner Frau Irmengard, geb. Schanz, in Dorfen geboren. Von 1959 bis 1963 besuchte ich die Volksschulen in Dorfen und Algasing. 1963 trat ich in das Mathematisch-naturwissenschaftliche Gymnasium in Erding ein, wo ich im Juni 1972 die Reifeprüfung ablegte.

Im Wintersemester 1972/73 begann ich das Studium der Humanmedizin an der Justus-Liebig-Universität Gießen und wechselte im Wintersemester 1973/74 an die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen. Nach dem zweiten Teil der Ärztlichen Prüfung war ich ab März 1978 im Rahmen des praktischen Jahres in den Fächern Chirurgie und Innere Medizin am Stadtkrankenhaus Hof und im Wahlfach Frauenheilkunde an der Universitäts-Frauenklinik Erlangen tätig. Im Mai 1979 bestand ich den dritten Teil der Ärztlichen Prüfung.

Seit Juli 1979 arbeite ich als Assistenzarzt an der gynäkologisch-geburtshilflichen Abteilung am Kreis-krankenhaus Burghausen.

Am 29. April 1977 heiratete ich Frä. Monika Hochholzer aus Erding. Wir haben eine Tochter Christine.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. V. Becker für die großzügige Bereitstellung von Arbeitsmöglichkeiten und Material am Pathologischen Institut.

Besonders möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. H.-J. Pesch für das Thema dieser Doktorarbeit sowie seine intensive Anleitung und Betreuung bedanken.

Für die Hilfe bei der Anfertigung der histologischen Präparate bin ich Herrn Dr. Menschke sowie Frl. Schaller und Frl. Kraus sehr zu Dank verpflichtet.

Schließlich danke ich Frl. Eglseder für die Ausfertigung der graphischen Darstellung und Frau Herbig für die umfangreichen Photoarbeiten.

